

지구온난화에 따른 제주도 근해의 해수면 상승과 제주도 동부 지역 지하수의 염수대 변화

김경호¹ · 신지연¹ · 고은희¹ · 고기원² · 이강근^{1*}

¹서울대학교 지구환경과학부, ²제주특별자치도 환경자원연구원

Sea Level Rise Around Jeju Island due to Global Warming and Movement of Groundwater/seawater Interface in the Eastern Part of Jeju Island

Kyung-Ho Kim¹ · Jiyoun Shin¹ · Eun-Heui Koh¹ · Gi-Won Koh² · Kang-Kun Lee^{1*}

¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

²Institute of Environmental Resources Research, Jeju Special Self-Governing Province

ABSTRACT

Groundwater is the main water resource in Jeju Island because storage of surface water in reservoir is difficult in the island due to the permeable volcanic rocks. Because of this reason, the groundwater is expected to be very vulnerable to seawater intrusion by global warming, which will cause sea level rise. The long term change of mean sea level around the Korean Peninsula including Jeju Island was analyzed for this study. The sea level rise over the past 40 years was estimated to be of 2.16 ± 1.71 mm/yr around the Korean Peninsula. However, the rising trend around the eastern part of Jeju Island was more remarkable. In addition, the groundwater/seawater intrusion monitoring network operated by the Jeju Special Self-Governing Province shows that seawater intrusion becomes more prominent during dry 4-5 months in a year when the sea level increases. This implies that the fresh groundwater lens in the eastern part of Jeju Island is influenced by the sea level rise due to global warming in the long term scale.

Key words : Global warming, Sea level rise, Jeju Island, Sea water intrusion, Climate change

요 약 문

제주도는 투수성이 좋은 화산암류로 형성이 되어 지표수의 발달이 빈약하므로 수원의 대부분을 지하수에 의존하고 있다. 따라서 지구 온난화로 인한 해수면 상승이 발생하여 지하수로의 해수 침투가 발생할 경우 매우 심각한 문제에 봉착할 수 있는 취약성을 지녔다. 본 연구에서는 장기 조위 관측 자료를 토대로 한반도 주변과 제주도 근해의 장기적인 해수면 변화를 분석하였다. 그 결과, 최근 40년 간 한반도 주변에서 해수면이 2.16 ± 1.71 mm/yr의 속도로 뚜렷한 상승 양상을 보였으며 제주도 해안에서는 더욱 빠른 속도로 해수면이 상승해 왔음을 알 수 있었다. 또한 제주특별자치도의 지하수/해수침투관측망의 지하수 관측 자료를 통하여 갈수기 중 해수면이 연주기적으로 상승하는 4-5개월 정도의 시기 동안 해수면의 상승에 따라 염수대가 육지 쪽으로 확장하여 침투하고 있는 것을 관측할 수 있었다. 이를 통하여 제주도 동부 지역이 장기적으로 해수면의 상승에 따라 염수대가 육지 쪽으로 확장하여 침투하였음을 간접적으로 보였다. 이는 지구 온난화에 의한 해수면의 상승이 그 동안 관찰되어 왔던 제주도 동부 지역의 해수 침투현상의 한 원인이 될 수 있음을 제시하고 있다.

주제어 : 지구온난화, 해수면 상승, 제주도, 해수침투, 기후변동

*Corresponding author :

원고접수일 : 2009. 5. 11 심사일 : 2009. 5. 22 게재승인일 : 2009. 6. 25

질의 및 토의 : 2009. 8. 31 까지

1. 서 론

지구온난화 현상은 지구시스템을 구성하는 육지, 대기, 해양, 생물 등의 시스템에 큰 영향을 준다. 지구온난화 현상에 의한 지구 시스템의 변화는 대체로 인간 사회에 악영향을 줄 것으로 보이며 해수면 상승은 특히 악영향을 줄 것으로 보이는 변화이다. 또한 UN 기후변화에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC, 2001) 3차 보고서에서는 21세기 말까지 인간의 활동에 의한 지구 온난화 현상에 의해 해수면이 최대 88 cm까지 상승할 것으로 예측한 바 있다. 이미 해수면 상승으로 인한 피해는 일부 국가에서 실제로 나타나기 시작하고 있으며 그 한 예로 남태평양의 산호초 섬들로 이루어진 소국 투발루를 들 수 있다. 투발루는 해수면 상승으로 인하여 국토의 상당부분이 해수에 침수되었으며 지하수의 염수화 현상이 심각해 식수마저 구하기 힘들어졌다. 투발루 정부는 이 섬에서의 생존이 힘들어짐에 따라 2001년, 국토 포기를 선언하고 주민을 뉴질랜드로 이주시키기 시작하였다. 21세기 말까지 해수면이 1 m 상승하면 방글라데시는 국토의 17%가 소실될 것으로 예상되며, 투발루나 몰디브는 해수면 아래로 잠기게 되고, 미얀마, 이집트와 같이 저지대 인구가 많은 국가는 큰 위기에 봉착하게 될 것으로 보인다.

우리나라에서도 해수면 상승에 의한 피해가 예상되고 있다. 조광우 외(2002)는 2100년까지 해수면 상승에 의한 최악의 시나리오를 적용할 경우 한반도에서 침수 가능 면적이 국토의 약 1.3%에 달하는 약 2,942 km²가 되며, 조석과 해일을 고려할 경우 약 149만 명이 침수의 위험에 노출되어 있어 막대한 피해가 발생할 수 있음을 예측한 바 있다. 이러한 심각한 문제를 야기할 수 있는 해수면 상승에 대하여 아직 우리나라에서는 많은 연구가 수행되지는 않았으며, 해수면 상승으로 인한 피해에 대한 보고나 그 피해를 예측한 연구 또한 많이 미흡한 실정이다.

제주도 동부 지역은 수십 년 전부터 고염분 지하수 부존 현상이 나타나는 지역으로 그 원인에 대한 여러 해석이 있어왔는데 본 연구에서는 한반도와 제주도 인근의 해수면 상승, 제주도 동부 지역 지하수의 염수대 변화 양상에 대한 관측 자료를 그 근거로 지구 온난화에 따른 제주도 근해의 해수면 상승 또한 제주도 동부 지역 지하수의 염수화 현상의 한 원인이 될 수 있음을 제시하고자 한다.

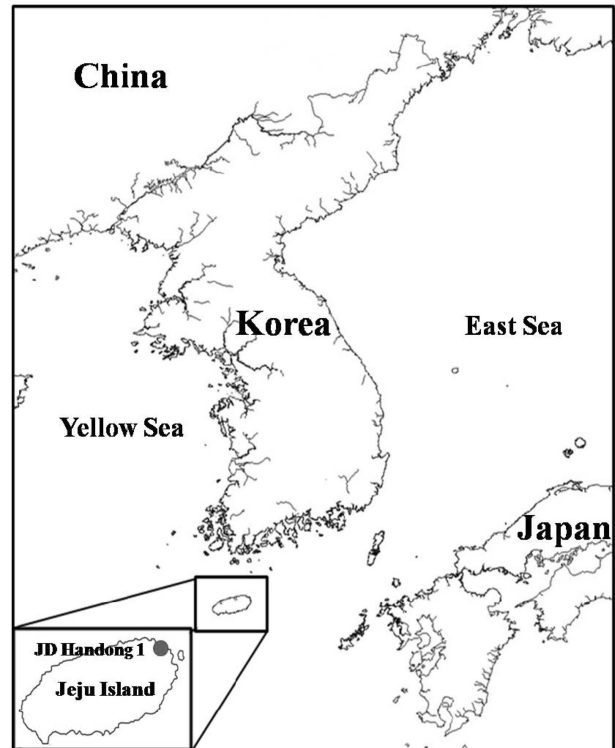


Fig. 1. Location of Jeju Island and Well JD Handong 1.

2. 연구 지역

제주도는 한반도 남서쪽 끝에 위치한(Fig. 1) 우리나라에서 가장 큰 섬으로 육지와 격리된 지리적 특수성으로 인하여 섬 내의 각종 생활 및 산업활동에 필요한 용수를 자체적으로 해결해야만 한다. 또한 제주도는 투수성이 좋은 화산암류로 형성이 되어 지표수의 발달이 빈약하므로 수원의 대부분을 지하수에 의존하고 있다. 이는 제주도가 지구 온난화로 인한 해수면 상승으로 지하수로의 해수 침투가 발생할 경우 수자원 확보에 심각한 문제가 생길 수 있는 취약성을 지녔음을 시사한다. 그러나 아직 해수면 상승이 제주도의 지하수 환경에 미치는 영향에 관한 연구는 미비한 실정이다.

제주도 동부 지역은 과거부터 지하수에 다량의 염분이 함유되어 있어 용수 이용에 많은 불편을 겪어왔으며(고기원, 1997), 그 원인에 대한 다양한 해석이 있어 왔다. 지하수의 주요한 염수화의 원인은 일반적으로 (1) 자연적인 지하수의 염수화, (2) 암염의 용해, (3) 해수의 침투, (4) 가스정이나 유정과 관련된 염수화 (5) 농업으로 인한 유출, (6) 토양의 염분 침투(saline seep), (7) 도로 제설제의 염분 등의 7가지를 들 수 있는데(Richter-Kreitler, 1993), 그 중에서도 제주도 동부 지역에서의 고염분 지하수

의 기원은 크게 3가지의 관점에서 다양한 해석이 있었다.

이 중 주류를 이루어 온 해석은 해수의 침투 현상으로 최순학(1988), 최순학·김영기(1989), 최순학 외(1991), 최윤영 외(1998), 이진용 외(2007) 등은 해수 침투 현상의 원인을 과잉 양수로 보았다. 두 번째로 윤정수(1986)는 토양 및 사구층 내의 염분 침투를 들었으며, 끝으로 고기원(1997), 제주도(2001) 등은 지질적인 구조에 의해 자연적으로 고염분 지하수가 존재한다 하였다. 한 편, 오윤근 외(2000), 김지영 외(2001)는 제주도 동부 지역 지하수의 성분 분석을 통하여 이 지역의 염분이 해안에서 기원하였다고 보고한 바 있어 염수화 원인이 해수의 침투에 기인한 것임을 강력히 시사하고 있다.

그러나 고기원(1997), 제주도(2001)는 제주도 동부 지역은 서부 지역에 비하여 지하수 이용량이 40%가 적고 개발 이용량이 적정 개발량의 16.5%에 불과하지만 지하수의 염수화 현상이 관찰되고, 제주도 서부 지역은 동부 지역처럼 염수화 현상이 나타나지 않는다고 보고하여 해수 침투 현상의 원인이 과잉 양수로 인한 것으로 보기에는 어려움이 있다고 지적하였다. 따라서 지금까지의 제주도 연안 내부의 원인들에 국한된 해석들만으로는 제주도 동부지역의 지하수 염수화 현상을 온전히 설명하기에는 충분하지 못한 점이 있다.

제주도는 화산쇄설암류와 화강암으로 이루어진 기반암 상부에 플라이오세에 퇴적된 (이성숙 외, 2004) 퇴적층인 U층이 분포한다. U층은 고기원(1997)에 의해 명명된 미교결 상태의 사니질 퇴적층으로, U층의 상부에는 불투수층의 역할을 하는 서귀포층이 존재하는데 이는 제주도 지하수의 부존 특성을 지배하는 중요한 인자로 제주도의 동쪽 지역은 서쪽 지역보다 2~3배 정도 깊은 곳에 위치한다. (Fig. 2, 제주도·한국수자원공사, 2003). 불투수층이 깊이

분포하는 지질학적인 특성상 제주도 동부 지역의 지하수는 염수와 담수의 밀도 차이에 의하여 정역학적인 평형을 이루고 있는 기저 지하수대로 분류되며 이는 해안에서 수 km 이상 떨어진 지점에서도 조석의 영향을 많이 받고 강수량의 영향은 적은 특징이 나타난다. 제주도 동부 지역의 이러한 지질 구조는 이 지역이 해수면 상승이 발생하였을 때 해수의 영향을 많이 받아 해수 침투에 매우 취약할 것임을 시사하고 있다.

3. 연구 방법

3.1. 이론적 배경

담수와 염수 사이의 정역학적 관계는 Ghyben-Herzberg relation(Ghyben, 1888; Herzberg, 1901)으로 설명할 수 있다. 이는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$z_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} z_w \quad (1)$$

여기서 z_s 는 해수면 하부의 담수 지하수 두께, z_w 는 해수면 상부의 담수 지하수의 두께, ρ_s 는 염수의 밀도, ρ_f 는 담수의 밀도를 각각 의미한다. 일반적으로 $\rho_s = 1.025 \text{ g/cm}^3$, $\rho_f = 1.000 \text{ g/cm}^3$ 이므로, 식 (2)와 같이 담수 지하수는 해수면 하부로 부존할 수 있는 두께는 해수면 상부 두께의 약 40배로 렌즈 형태로 염수대 상단에 떠 있게 된다.

$$z_s = 40z_w \quad (2)$$

하지만 만일 지구온난화 등과 같은 이유로 해수면이 상승하게 된다면 기존의 Ghyben-Herzberg relation에 의해 형성된 담수 렌즈에 변화가 생기게 된다. Fig. 3은 해수

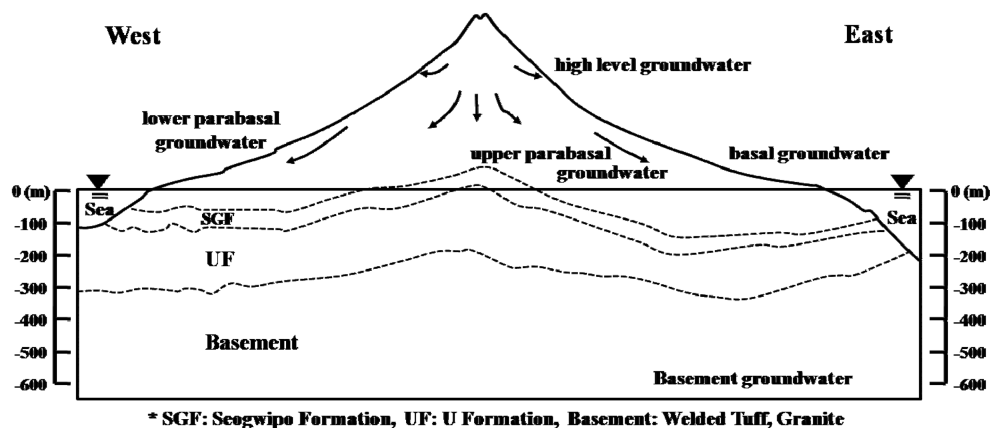


Fig. 2. Schematic model showing hydrogeologic structures and occurrences of groundwater in Jeju Island (modified from Koh et al., 1997).

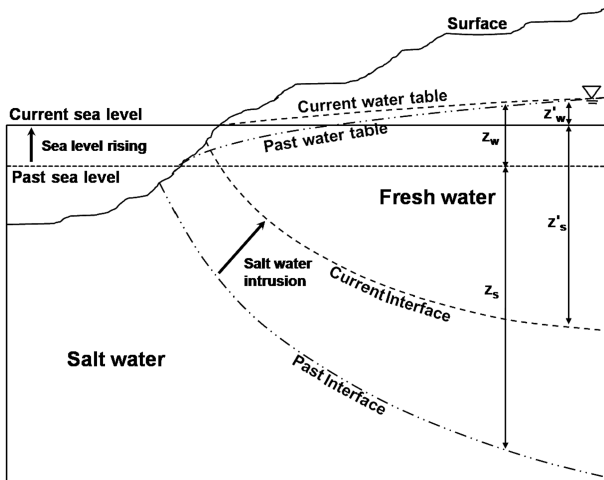


Fig. 3. Conceptual model of salt water intrusion caused by sea level rise. z_s is the depth to the salt-water interface below sea level before sea level rise, z_w is the elevation of the water table above sea level before sea level rise, z'_s is the depth to the salt-water interface below sea level after sea level rise, z'_w is the elevation of the water table above sea level after sea level rise, respectively.

면이 상승할 때 발생하는 담수 렌즈의 변화를 나타낸 모식도이다. 해수면이 상승하게 되면 해수 위에 떠 있는 담수 렌즈 전체가 상승하게 되어 담수와 해수의 경계면이 좀 더 상승하게 되므로 이는 일차적인 해수 침투의 원인이 된다. 그러나 이에 더해 해수면 상승으로 인하여 지하수위가 상승하게 되면 실제로는 유출이 발생하게 되므로 해수면이 상승하는 높이보다 담수 렌즈의 지하수위 상승 폭이 훨씬 더 적어지게 되고 이는 해수 침투의 직접적인 원인이 된다. 특히 Ghyben-Herzberg relation에 의하면 해수면이 상승할 때, 그 상승 높이와 비교하여 유출로 인하여 지하수위 상승 높이가 그에 못 미치게 된다면 이는 정역학적 평형을 위하여 그 차이보다 40배 가량 두께의 해수 침투를 허용해야 한다는 것을 알 수 있다. 이는 고작 수 센티미터의 해수면 상승도 수 미터의 해수 침투로 나타날 수 있다는 것을 의미한다.

실제로 지난 1세기 동안 지중해의 해수면이 약 70 cm 가 상승하였고 그로 인하여 나일강 삼각주의 대수층에서 해수 침투가 보고되고 있다. 이 지역에서는 0.5 m 해수면이 상승할 때 담수-경계면이 1.5 km 내륙으로 침투한다는 시뮬레이션 결과도 보고된 바 있다(Sherif · Vijay, 1999).

3.2. 우리나라 근해의 해수면 상승 조사

지구온난화로 인한 해수면 상승은 전 지구적인 현상으로 지금까지의 많은 연구에서 다양하게 보고되고 있다

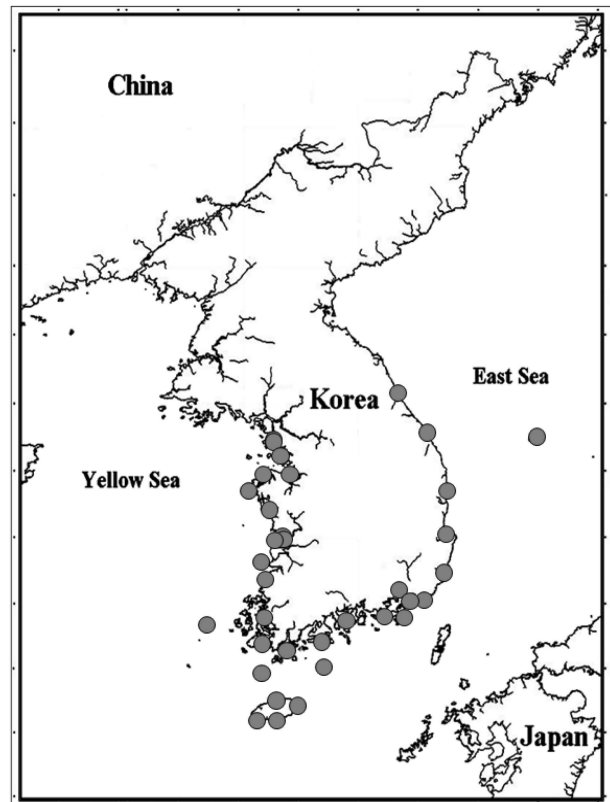


Fig. 4. Location of Korean tide-gauge stations.

(Table 1). IPCC(2007)는 20세기 동안 전 세계적인 해수면 상승 속도는 약 1.7 ± 0.5 mm/yr로 추정하였으며, 1961-2003년까지의 최근 40여 년간의 상승 속도는 1.8 ± 0.5 mm/yr에 달하였다고 보고하였다. 세계적으로는 서구 선진국들에서는 100년 이상의 비교적 장기간의 해수면 관측 자료를 보유하고 있으며 이들 국가들이 위치한 대서양과 지중해 연안에서의 관측 자료들을 중심으로 대부분의 연구가 많이 이루어져 오고 있는데 반해, 우리나라는 서구 선진국에 비하여 해수면 관측 자료가 훨씬 적고 특히 장기적인 관측자료의 축적이 많이 미비하여 관련 연구가 활발히 이루어지기 힘든 실정이다. 우리나라의 경우 국립해양조사원(NORI, National Oceanographic Research Institute)에서 1952년 8월 목포에서의 조위 관측을 시작으로 2007년 현재 37개의 조위 관측소를 운영하고 있으나(Fig. 4), 40년 이상의 장기 관측 자료를 축적한 관측소는 단 10개, 20년 이상의 관측 자료를 축적한 곳은 22개소에 불과하다.

비록 서구 선진국 수준의 장기적인 관측 자료가 축적이 되지는 못하였지만 우리나라 인근의 해수면 상승에 대한 연구들이 다양한 방법으로 수행되어 왔는데(Table 2) 이들 연구에서는 한반도 주변의 해수면 상승 속도가 최근

Table 1. Estimated global sea level rise (updated from Warrick and Oerlemans, 1990; Robin 1986)

Rate (mm/yr)	Comments	References
> 0.5	Cryologic estimate	Thorarinsson (1940)
1.1 ± 0.8	Many stations, 1807-1939	Guetenburg (1941)
1.2 - 1.4	Combined methods	Kuenen (1950)
1.1 ± 0.4	6 stations, 1807-1943	Lisitzin (1958, in Lisitzin, 1974)
1.2	Selected stations, 1900-1950	Fairbridge · Krebs (1962)
3.0	Many stations, 1935-1975	Emery (1980)
1.2 ± 0.1†	193 stations → 14 regions, 1880-1980	Gorniz et al. (1982)
1.5	Many stations, 1900-1975	Klige (1982)
1.5 ± 0.15†	9 stations, 1903-1969	Barnett (1983)
1.4 ± 0.14†	155 stations, 1881-1980	Barnett (1984)
0-3	Many stations	Aubrey (1985)
1.2 ± 0.3†	130 stations, 1880-1982	Gornitz · Lebedeff (1987)*
0.1†	130 stations → 11 regions, 1880-1982	Gornitz · Lebedeff (1987)*
1.0 to 1.5	44 East Coast U.S. stations, 1920-1983	Braatz · Aubrey (1987)
1.15	155 stations, 1880-1986	Barnett (1988)
0.4 - 0.6	58 Europe stations, 1920-1980	Pirazzoli (1989)
2.4 ± 0.9§	40 stations, 1920-1970	Peltier · Tushingham (1989; 1991)**
1.75 ± 0.13§	84 stations, 1900-1986	Trupin · Wahr (1990)**
1.67 ± 0.33	69 stations, 1900-1986	Wahr · Trupin (1990)**
1.26 ± 0.78	U.S. east coast, 1880-1980	Gornitz · Seeber (1990)
1.8 ± 0.1°	21 stations, 1880-1980	Douglas (1991)**

Notes:

† = Value plus 95% confidence interval

§ = Mean and standard deviation

° = Standard error

* = Long-term crustal motions removed

** = Glacio- and hydro-isostatic effects removed

Table 2. Estimated sea level rise around Korea

Rate (mm/yr)	Comments	References
0.9 ± 2.9§	16 stations around Korea, Japan, and Russia, 1965-1985	Pang et al. (1994)
4.6-4.8	Topex/Poseidon and ERS data around Korean Peninsula and East sea, 1992-2001	Cho · Kim (2001)
2.30 ± 2.22	23 stations around the Korean Peninsula, 1960-1999	Cho (2002)
1-3	6 stations at the southwestern coast, 1960-2003	Kang et al. (2005)
3.89	multi-satellite data around the Korean Peninsula, 1993-2005	Ha et al. (2006)

40여 년간 약 1-3 mm의 범위에 있음을 보였으며, 대체로 세계 평균 해수면 상승 속도를 약간 상회하는 속도로 해수면이 상승하고 있음을 보였다. 이 연구에서는 국립해양조사원(NORI, National Oceanographic Research Institute)에서 운영하는 국가 해양 관측망의 조위 관측 자료를 토대로 한반도 근해와 제주도 지역의 해수면 상승 양상을 조사해 보았다.

조위 관측 자료는 다음과 같이 처리하였다. 조위 관측 자료는 지구의 공전과 자전, 달의 공전 등에 의한 연, 월, 일 단위의 다양한 주기성을 띤 시계열 자료이다. 이러한

주기적 특성을 상쇄시키기 위해 일평균 해수위의 산술 평균으로 월평균 해수위를 구하였다. 다음으로 월평균 해수위의 산술 평균으로 연평균 해수위를 얻었다. 연평균 해수위를 구하는 과정에서 결측치가 있는 월이 있는 연도의 자료는 제외하여 특정 월의 결측으로 인한 평균값의 왜곡을 줄였다. 다음으로 관측 기간 동안 방조제 건설과 같은 대형 토목 공사가 있어 인공적인 해수면 변동이 큰 지역의 관측 자료를 제외하였다(여수, 군산 내항). 또한 총 관측 기간이 10년을 넘지 않는 검조소의 관측 자료는 해수면 변동의 추세성을 알아보기에는 그 자료의 수가 너무

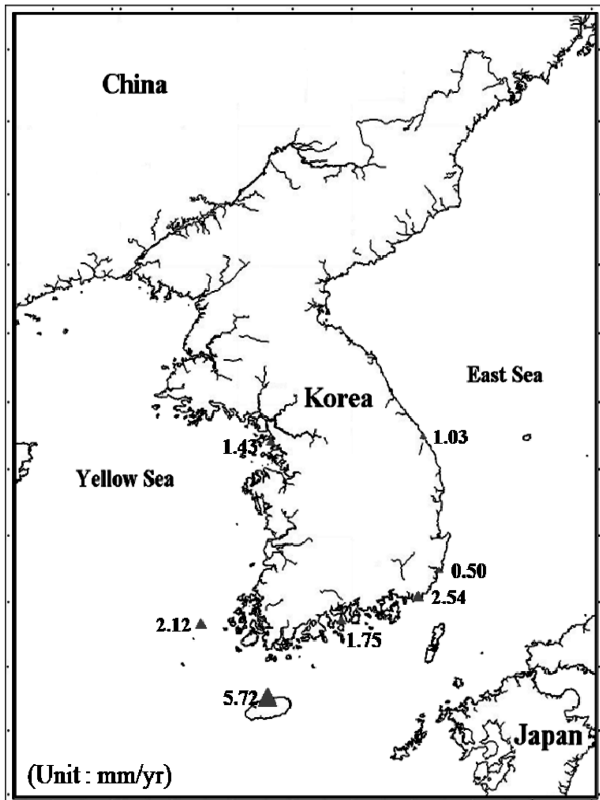


Fig. 5. Sea level rise rate around Korea for the last 40 years (1968-2007).

부족하므로 제외하였으며 결측치가 있는 월이 포함된 연도가 전체 관측 기간의 50%를 넘는 검조소의 관측 자료 또한 전체적인 추세성에 왜곡이 크므로 제외하였다. 총 37개의 조위 관측 자료 중 위와 같은 과정을 통해 40년 이상 7개 지점, 10년 이상 19개 지점에 대하여 최소자승법을 통한 회귀분석으로 각각 최근 40년간과 10년간의 연평균 해수면 상승 속도를 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 우리나라 근해의 해수면 상승 양상

국립해양조사원(NORI, National Oceanographic Research Institute)의 조위 관측 자료를 통하여 한반도 주변의 연평균 해수면 상승 속도를 계산한 결과는 다음과 같다. 먼저 40년 이상의 장기 관측 자료가 축적된 곳은 모두 7개 검조소로 그 결과는 Fig. 5와 같으며 7개 검조소 모두에서 해수면이 상승한 것으로 나타났다. 7개 지점에서 1968-2007년까지의 40년간 연평균 해수면 상승속도는 2.16 ± 1.71 mm/yr로 나타났다. 이는 비슷한 기간인 1961-2003년의 세계 평균 상승 속도로 추산된 1.8 ± 0.5 mm/

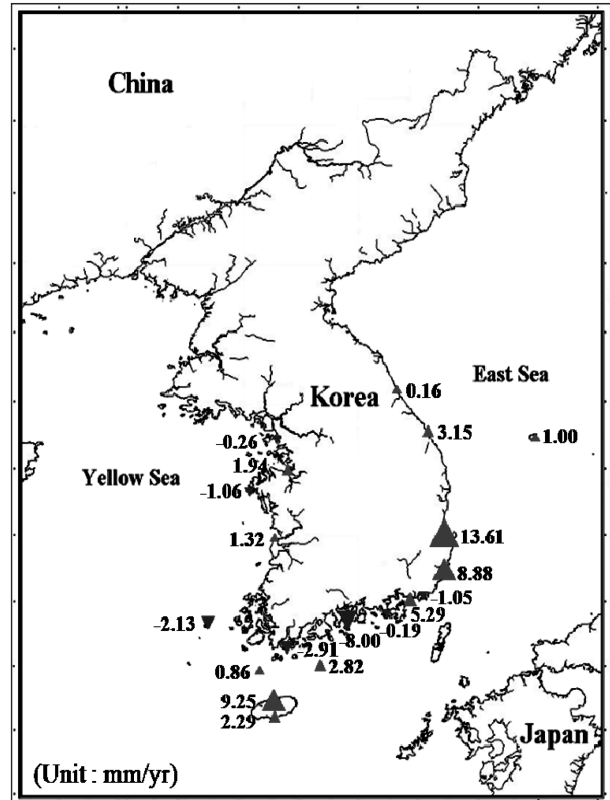


Fig. 6. Sea level rise rate around Korea for the recent 10 years(1998-2007).

yr(IPCC, 2007)를 약간 상회하는 수준이며 다른 기존의 연구들(Table 1)에서 조사된 전 지구적 해수면 상승 속도 보다도 역시 상회하는 것으로 나타났다. 한편 국내 해수면 상승속도를 연구한 기존의 연구들(Table 2)과는 거의 비슷한 범위의 값을 보여 조사 결과는 충분히 신뢰할만한 값을 보였다.

전국적으로 해수면 상승 속도는 세계 평균을 대체로 상회하고 있었으며 제주도 지역은 특히 빠른 해수면 상승 속도를 보였다. 그리고 동해안이 대체로 가장 느린 상승 속도를 보인 반면, 남해안이 가장 빠른 해수면 상승 속도를 보였다.

한편 10년 이상의 장기 관측 자료가 축적된 곳은 모두 19개 지점으로 최근인 1998-2007년까지의 10년간의 연평균 해수면 상승 속도를 계산한 결과는 Fig. 6과 같이 나타났다. 전체 19개의 해당 검조소의 관측 결과 중 12개 검조소에서 상승, 7개 검조소에서 하강현상이 일어났으며 동해안은 대체로 상승, 남해안은 하강현상이 일어났으나 유독 제주도 인근에서는 두드러진 해수면 상승이 일어났음을 알 수 있었다. 또한 포항, 울산 인근의 해안에서 매우 빠른 속도의 해수면이 상승이 관측되었다. 전체 19개

지점의 평균은 1.84 ± 4.85 mm/yr로 이는 전지구적인 해수면 상승 속도 평균치와 거의 유사한 결과를 보였다.

이와 같이 우리나라의 10, 40년간의 연평균 해수면 상승 속도는 비록 검조소의 개수가 적기는 하나 40년 이상의 자료가 축적된 7개 검조소 모든 지역에서 상승으로 나타났다. 이는 만일 상승과 하강에 아무런 경향성이 없는데 우연히 7개 검조소 모두에서 상승으로 결과가 나타났을 확률은 약 0.7%에 불과하다. 따라서 우리나라 근해는 높은 신뢰도에 기반하여 지난 40년간 연평균 해수면이 상승하는 강한 경향성이 있었다고 결론지을 수 있다.

4.2. 제주도의 해수면 상승 양상

국립해양조사원(NORI, National Oceanographic Research Institute)의 조위 관측 자료를 통한 우리나라 해안의 연평균 해수면 상승 양상을 조사한 결과에서 제주도는 특히 두드러지게 빠른 해수면 상승 속도를 보였다. 2009년 현재 국립해양조사원은 제주도에 모두 4개의 검조소를 운영하고 있으나, 10년 이상의 장기 관측 자료가 축적이 된 곳은 제주, 서귀포 검조소 2곳뿐이다.

전술한 바와 같이 제주도는 한반도 주변 해역에서 지난 40여년 간 가장 빠른 해수면 상승을 보인 곳으로 특히 제주도의 북쪽 해안인 제주 검조소는 1964-2008년까지의 44년 동안 23 cm의 해수면 상승과 5.3 mm/yr의 평균 해수면 상승 속도가 관측되었다. 제주도의 남쪽 해안인 서귀포 검조소에서는 1985-2008년까지 23년간 13 cm의 해수면 상승과 5.8 mm/yr의 평균 해수면 상승 속도가 관측되었다. 제주, 서귀포 검조소 모두 한반도 주변과 세계의 평균 해수면 상승 속도를 크게 상회하고 있었으며 이는 제주도가 해수면 상승으로 인한 지하수 환경 변화가 발생

할 가능성이 매우 높음을 시사한다. Fig. 7은 국립해양조사원의 제주도에 설치된 4개 검조소의 조위 관측 자료이다. 각 검조소의 연평균 해수면 관측치는 상호 비교를 쉽게 하기 위해 실제 관측자료를 MSL(Mean Sea Level) 축 방향으로 평행이동하였으며, 제주 관측소의 관측 시작년도인 1964년의 자료를 0 cm로 두었다. 결측월이 있는 자료의 경우 흰색으로 표기하였으며, 결측월의 데이터는 해당 검조소에서 가장 가까운 인근의 두 검조소에서의 관측이 이루어진 결측월의 관측값과 직전·직후 월의 관측값들과의 차의 비율에 검조소와의 거리의 역수를 가중치로 한 선형결합을 통하여 결측월의 값을 추정하였다. 결측월이 있는 연도의 자료들의 대부분은 그 결측월이 연중 1개월 내외에 그쳤기 때문에 비록 일부 연도에서 연평균 자료가 추정을 통해 구해졌다고는 하나 이 자료들의 신뢰도는 매우 높다.

모슬포와 성산포는 5년간의 자료밖에 축적이 되지 않아 그 경향성을 입증하기에는 그 자료의 수가 너무 적다. 하지만, 제주도의 북쪽과 남쪽에 각각 위치한 제주와 서귀포 검조소의 관측 자료에서의 관측값과 매년 그 관측값 자체가 매우 흡사한 양상으로 나타나고 있으며 지리적인 근접성을 고려할 때 이 검조소가 위치한 지역들도 서귀포나 제주도와 같이 장기간의 관측이 이루어졌다면 인근의 제주 검조소나 서귀포 검조소에서의 관측치와 비슷한 양상으로 매우 빠르고 뚜렷한 해수면 상승 경향을 보였을 것으로 추정된다.

4.3. 제주도 동부 해안 지역의 지하수 관측 자료 분석

제주특별자치도 환경자원연구원에서 2001년 말부터 운영하고 있는 지하수/해수침투관측망에서의 지하수 관측 자

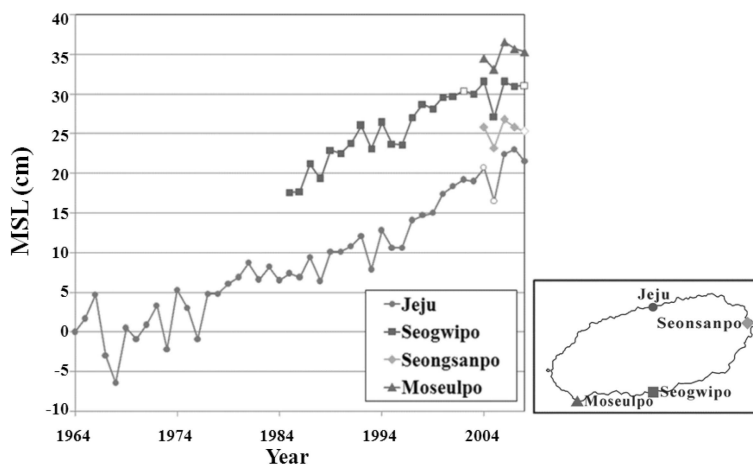


Fig. 7. Annual mean sea level at tide-gauge stations in Jeju Island during 1964-2008.

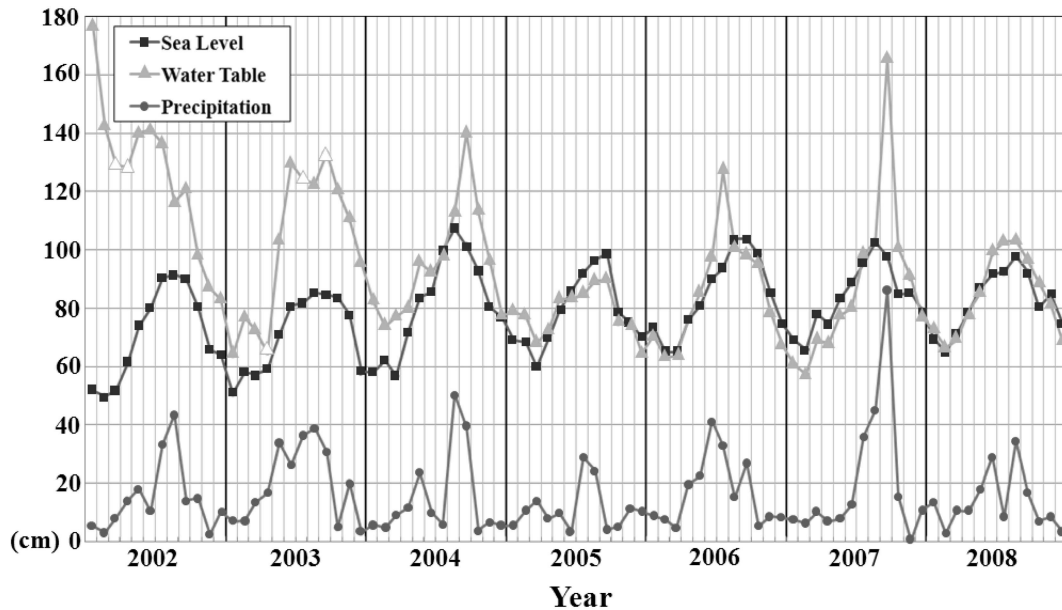


Fig. 8. Monthly mean sea level, water table and precipitation at Well JD Handong 1 during 2002-2008. Precipitation records are represented by a line graph not by a bar graph for the comparison with sea level and water table records. The line graph for precipitation does not mean continuous rain fall. Small solid circles on the line graph for precipitation mean accumulated precipitation for a month.

료를 통하여 제주도 동부 해안 지역의 지하수 환경 변화를 분석해 보았다. 해수면 관측 자료는 제주 조위 관측소의 44년 간의 장기 관측 자료를 비롯하여 20년 이상의 서귀포 조위 관측소의 자료 등을 통하여 뚜렷한 해수면 상승 경향을 강력히 추정할 수 있지만, 제주도의 지하수/해수침투관측망에서의 지하수 관측 자료는 가장 긴 기간의 자료를 축적하고 있는 관측정에서도 2002-2008년의 7년 간의 자료 밖에 축적되어 있지 않기 때문에 지하수 환경 변화에 대한 장기간의 뚜렷한 경향성을 관찰하고 입증하기에는 그 관측 기간이 매우 짧다는 한계가 있다. 특히 Fig. 7의 그래프에서 관측된 연평균 해수면 변화 양상을 볼 때에도 2002-2008년의 7년간은 해수면의 상승 또는 하강의 경향성이 나타나지 않는 단기간으로 이 기간의 자료만으로는 지하수 환경 변화를 추정하기에는 부적합하다. 따라서 해수면 상승에 의한 지하수 환경 변화를 간접적으로 관찰할 수 있는 월평균 자료를 이용하여 분석을 수행하였다.

Fig. 1은 그 분석 대상이 된 한동 1호공의 위치로 제주도의 동북부인 제주특별자치도 제주시 구좌읍 행원리에 위치하고 있으며, 해안에서 822 m 떨어져 있는 심도 175 m의 관측정이다. 한동 1호공은 제주도 동부지역 지하수/해수침투 관측망 중 최장기간의 관측자료가 축적된 곳으로 제주도 동부 지역의 지하수 환경 고유의 특징이 잘 나타나는 지역에 위치하고 있다. Fig. 8은 한동 1호공에서

의 월평균 지하수위 변화와 해수면, 강수량을 함께 나타낸 그래프이다. 해수면 변화는 제주, 성산, 서귀포 조위 관측소의 자료를 활용하여 추정하였다. 결측일이 있는 월의 자료의 경우 흰색으로 표기하였다. 해수면은 한동 1호공과 가장 가까운 검조소인 제주, 성산, 서귀포 검조소와의 거리의 역수를 가중치로 한 선형결합을 통하여 결측월의 값을 추정하였다. 강수량은 한동 1호공에서 가장 가까운 기상관측소인 성산, 제주, 서귀포 기상 관측소의 관측 자료를 이용하여 추정하였으며 추정 방법은 해수면과 동일하게 한동 1호공과의 거리의 역수를 가중치로 한 선형결합을 통하여 추정하였다. 강수량을 제외한 해수면과 지하수위는 서로 비교를 용이하게 하기 위하여 각각의 그래프를 평행이동하여 겹쳐서 나타내었다. Fig. 8에서 강수량 또한 꺾은선 그래프로 표현하였는데, 강수량은 막대 그래프로 표현하는 것이 일반적이나 여기에서는 해수면, 지하수위 변화와의 비교를 용이하게 하기 위하여 꺾은 선 그래프로 표현하였으며, 이 꺾은선 그래프가 연속적인 강수 발생을 의미하는 것은 아니다. 강수량 그래프 상의 원이 각 해당 월의 월평균 강수량으로 이는 월간 누적치를 의미한다.

월평균으로 나타낸 해수면, 지하수위, 강수량 그래프는 모두 겨울철에 하강하고 여름철에 상승하는 연주기성을 보이고 있어 단순한 상관관계 분석만으로는 각 인자들의 직접적인 연관 관계를 분석하기에는 어려움이 있다. 한반도를 비롯한 제주도 인근은 여름에 상대적으로 강수가 집

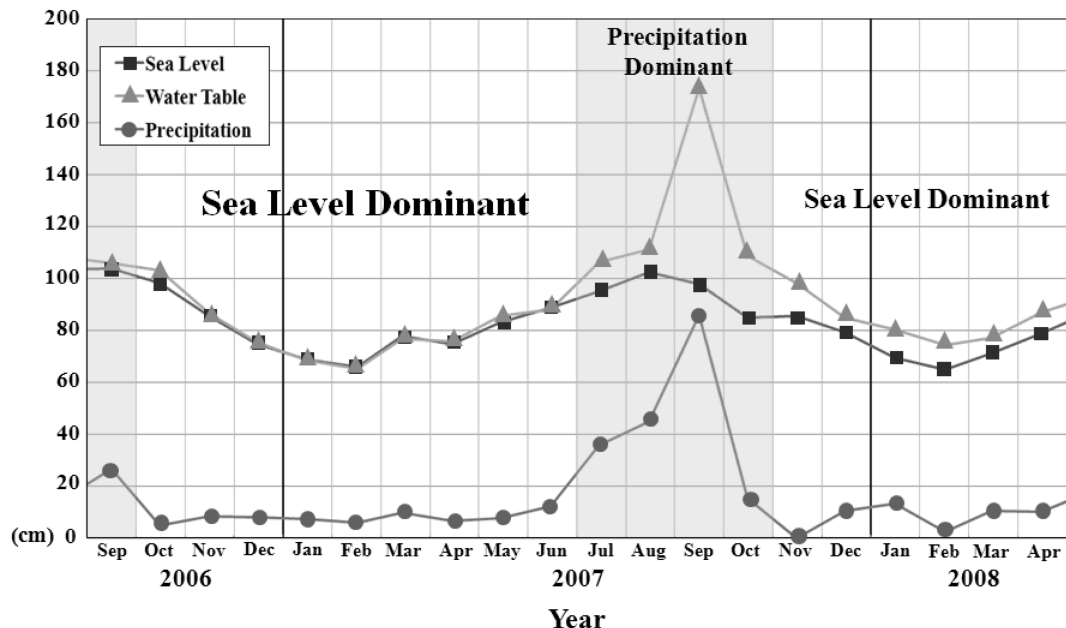


Fig. 9. Monthly mean sea level, water table and precipitation at Well JD Handong 1 during 2006-2008. Precipitation records are represented by a line graph not by a bar graph for the comparison with sea level and water table records. The line graph for precipitation does not mean continuous rain fall. Small solid circles on the line graph for precipitation mean accumulated precipitation for a month.

증되는 풍수기가 되며 가을에서 봄까지는 강수량이 적은 갈수기가 된다. 또한 해수면도 겨울에는 낮고 여름에는 대체로 높아지는 경향성을 관찰할 수 있다. 한반도 주변의 해역에서는 8~9월에 해수면이 가장 높아지며 이는 수온의 상승으로 인한 열팽창이 그 주된 원인이다.

이러한 연주기적인 현상의 패턴을 Fig. 9에서 자세하게 나타내 보았다. Fig. 9는 Fig. 8의 7년 간의 자료 중에서 2006년 말에서 2008년 초까지의 기간 동안의 해수면, 지하수위, 강수량을 함께 나타낸 그래프로 2006년 말에서 2007년 중반까지의 기간에 해수면과 지하수위 간의 상호관계를 잘 파악할 수 있도록 각 그래프를 평행이동하여 나타내었다. 여기서 2006년 10월부터 2007년 6월까지 월 강수량이 100 mm에 못 미치는 갈수기에는 해수면과 지하수위가 거의 동일하게 움직이고 있다는 점을 알 수 있다. 이 후 2007년 7월부터 10월까지 여름철의 풍수기가 오면 지하수위는 강수량의 큰 영향을 받게 되어 강수가 집중되는 월의 지하수위는 급격히 상승하며 강수량과 비슷한 양상의 움직임을 보인다. 이후 다시 강수량이 줄어드는 겨울철이 오면 지하수위는 하강하고 다시 해수면의 움직임을 따라 변화하는 형태를 보인다. 이러한 연주기적인 변화를 따라 제주도 동부 지역의 지하수위는 해수면과 강수량 모두의 직접적인 영향을 받지만, 풍수기를 제외한 갈수기에는 해수면 변화의 직접적인 영향을 받는다. 이는 장기적으로 해수면이 상승하는 경향으로의 변동이 있을

때 제주도 동부 지역의 지하수위가 해수면을 따라 상승할 수 있음을 강력히 시사하는 증거가 될 수 있다.

한편 Fig. 10에서는 전술한 한동 1호공에서 2002-2008년까지 7년 간의 해수면, 지하수위, 전기전도도 값을 함께 나타내었다. 전기전도도의 값은 관측 심도에서 계절별로 담·염수 경계면이 이동함에 따라 그 값이 매우 급격히 변화하는 양상을 보인다. Fig. 11에서는 해수면·지하수위와 전기전도도 간의 상호관계를 잘 파악할 수 있도록 Fig. 9에서 분석한 시기와 동일한 2006년 말에서 2008년 초까지의 기간 동안의 각각의 월평균 값을 함께 나타낸 그래프이다. 앞서 Fig. 9에서 지하수위에 해수면이 지배적으로 영향을 미치는 시기로 파악된 2006년 10월에서 2007년 6월까지의 갈수기에는 전기전도도가 꾸준히 상승함을 알 수 있는데, 이는 해수면의 상승이 지하수위를 상승시키면서 해수가 육지 쪽으로 침투하면서 나타난 현상으로 풀이된다. 이러한 현상은 장기적으로 해수면이 상승하였을 때, 해안의 지하수위가 상승하며 해수가 육지 쪽으로 침투하는 양상을 설명하는 Fig. 3의 모델이 실제로 일어나고 있을 가능성이 높음을 시사한다. 반면 2007년 7월부터 10월까지의 강수량이 지하수위에 큰 영향을 주는 풍수기에는 이 지점의 전기전도도값이 다시 서서히 낮아짐을 보이는데 이는 강수량이 증가하면 담수체 렌즈가 두꺼워져 그 압력이 증가하여 염수대가 다시 육지에서 해안 쪽으로 밀려남에 따라 일어나는 현상으로 보인다. 풍수기

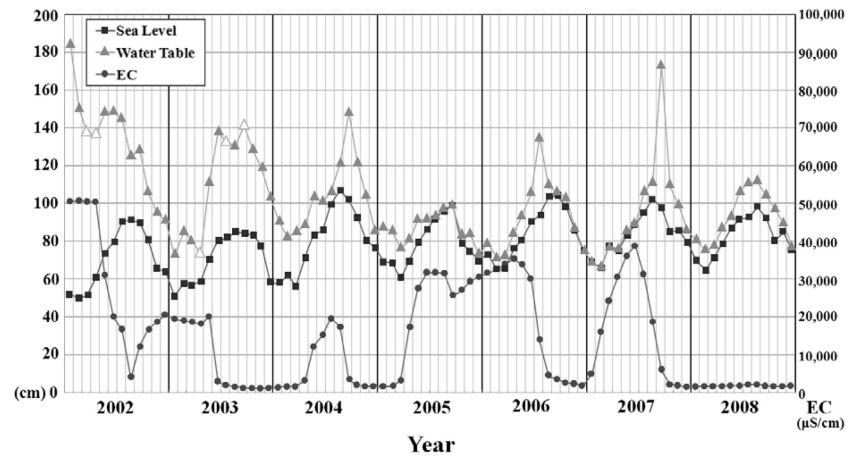


Fig. 10. Monthly mean sea level, water table and electric conductivity at Well JD Handong 1 for 2002-2008.

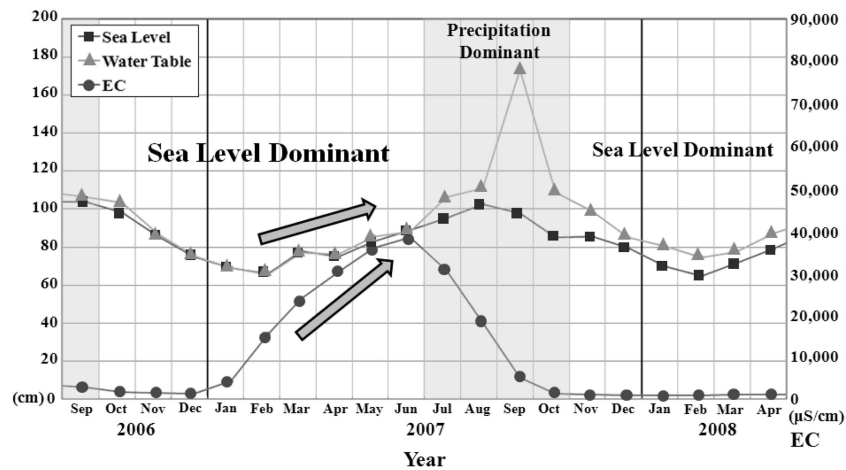


Fig. 11. Monthly mean sea level, water table and electric conductivity at Well JD Handong 1 during 2006-2008.

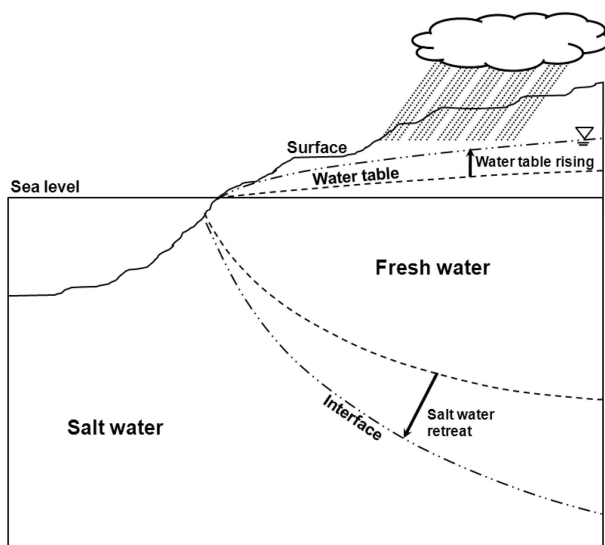


Fig. 12. Conceptual model of extension of the fresh water lens caused by heavy precipitation.

에 발생하는 현상은 Fig. 12에 도시하였다. 풍수기가 끝나 갈수기가 오면 다시 전기전도도가 크게 낮아지고 수개월 후 해수면이 하강함에 따라 지하수위도 전기전도도보다 수 개월 늦게 해수면의 하강을 따라 하강을 하면서 다시 해수면 변화가 지하수위 변화에 큰 영향을 주는 갈수기가 나타나는 연주기적인 패턴이 나타난다. 이와 비슷한 양상은 한동 1호공 뿐만이 아니라 제주도 동부 해안에서 가까운 지하수 관측점에서 공통적으로 나타나는 현상으로 제주도 동부 지역은 해수면이 상승하면 그 직접적인 영향을 받아 지하수로의 해수 침투가 발생할 수 있다는 것을 강력히 시사한다.

5. 결 론

이 연구에서는 수 십년 전부터 보고되어 온 제주도 동

부 지역 지하수 염수대 확장의 원인으로 제주도 외적 인자인 지구 온난화로 인한 해수면 상승이 그 한 원인이 될 수 있는 가능성을 제시하였다. 국립해양조사원(NORI)의 조위 관측 자료를 통하여 한반도 근해의 장기적인 해수면 변화 양상을 분석해 본 결과, 40년 이상의 장기적인 관측 자료가 축적된 7개 지점의 1967-2008년까지의 40년간 연평균 해수면 상승속도는 2.16 ± 1.71 mm/yr로 나타났으며 7개 지점 모두에서 해수면이 상승하였다. 또한 전 지구적인 규모에서 해수면 변화를 관측한 연구나 한반도 근해의 기존 해수면 변화 양상을 연구한 기존의 연구 결과들을 토대로 볼 때에도 한반도 근해의 해수면 상승 양상은 확실한 추세로 보인다. 특히 연구 대상 지역인 제주도는 우리나라 근해에서도 가장 두드러진 해수면 상승이 발생해 온 지역으로 보이며 이는 특히 해수의 직접적인 영향을 받는 제주도 동부 지역의 기저지하수가 이 영향을 받았을 가능성이 높음을 시사한다.

이러한 해수면 변화에 의한 지하수 환경의 변화 양상을 직접적으로 관찰 수 있는 장기적인 지하수 관측 자료가 부재하기는 하나 2001년 말부터 제주특별자치도 환경자원연구원에서 운영하고 있는 지하수/해수침투관측망에서의 지하수 관측 자료를 통하여 제주도 동부 해안 지역의 지하수 환경 변화를 분석해 보았다. 제주도 동부 지역에서는 강수량이 적은 갈수기인 가을에서 이듬해 초여름까지의 8개월 가량은 지하수위가 해수면의 영향을 직접적으로 받는 것으로 보인다. 특히 봄에는 해수면이 연주기적으로 상승하는 4-5개월 정도의 짧은 시기가 나타나는데 이 때에는 해수면의 상승에 따라 지하수위 또한 상승하며 전기전도도 또한 크게 상승하여 염수대가 육지 쪽으로 확장하여 침투하고 있는 것으로 보인다. 이는 비록 수십 년간의 장기적인 관측자료는 아니지만 일단위나 월 단위 수준의 단기간의 조석의 영향은 충분히 무시될 만한 장기간의 관측 결과이며 제주도 동부 해안에서 가까운 지하수 관측점에서 공통적으로 나타나는 현상이다. 이를 고려할 때, 제주도 동부 지역의 지하수는 해수면 상승의 영향을 직접적으로 받는 지역으로 장기적으로 지속적인 해수면 상승이 발생하였을 때, 그 영향으로 지하수위가 상승하고 염수대가 육지 쪽으로 침투하는 현상이 나타날 가능성이 매우 높을 것으로 보인다. 또한 과거부터 보고되어 왔던 제주도 동부 지역에서 지하수 염수대 확장의 원인 중의 하나로 이러한 전 지구적인 해수면 상승 또한 충분히 고려하여야 할 필요가 있을 것이며 해수면 상승은 앞으로도 지속될 것으로 보이기 때문에 이에 대한 면밀한 관찰과 지속적인 관심이 필요할 것이다.

사 사

이 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호: 3-4-3)의 지원에 의해 수행되었습니다. 이 연구에 많은 자료를 제공해 주신 제주특별자치도 환경자원연구원 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강주환, 문승록, 오남선, 2005, 서남해안의 해수면 상승, 대한토목학회논문집, **25(2B)**, 151-157.
- 고기원, 1997, 제주도 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 박사학위논문, 부산대학교.
- 김지영, 오윤근, 류성필, 2001, 제주도 동부지역 지하수의 염수화에 관한 연구, 한국환경과학회지, **10(1)**, 47-58.
- 오윤근, 김경훈, 류성필, 2000, 제주도 동부지역 지하수의 염수화와 이화학적 특성, 한국환경과학회지, **9(3)**, 253-259.
- 윤정수, 1986, 제주동부지역 지하수의 고염도 요인에 관한 연구, 제주도연구, **3**, 43-53.
- 이성숙, 박영숙, 윤선, 정차연, 윤해수, 이종덕, 2004, 제주도 동부지역 시추공내 서귀포층과 "U"층의 미화석 특성, 한국고생물학회, **20(1)**, 51-52.
- 이진용, 이규상, 송성호, 2007, An Interpretation of Changes in Groundwater Level and Electrical Conductivity in Monitoring Wells in Jeju Island, *J. Korean Earth Science Society*, **28(7)**, 925-935.
- 제주도, 2001, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(I), 제주, p. 378.
- 제주도, 한국수자원공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(III), 제주, p. 425.
- 조광우, 김지혜, 2001, 지구온난화에 따른 한반도 주변의 해수면 변화와 그 영향에 관한 연구 I, 한국환경정책·평가연구원, p. 125.
- 조광우, 김지혜, 정휘철, Mimura, N., Nicholls, R., 2002, 지구온난화에 따른 한반도 주변의 해수면 변화와 그 영향에 관한 연구 II, 한국환경정책·평가연구원, p. 220.
- 최순학, 1988, 제주도의 형성과 지하수 특성, 제주도연구, **5**, 59-77.
- 최순학, 김영기, 1989, 제주도 지하수의 수질특성, 지질학회지, **25(3)**, 230-238.
- 최순학, 김영기, 이동영, 1991, Sea Water Intrusion in the Coastal Area Of Cheju Volcanic Island, Korea, *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, **24(3)**, 319-327.
- 최윤영, 고병련, 심창석, 최정우, 고수현, 1998, 제주도 동부지역에서 해수침입에 의한 지하수 염분화에 관한 연구, 한국수처리연구회, **6(4)**, 15-26.

- 하경자, 정기용, 장새롬, 김기영, 2006, 복합위성자료 (Topex/Poseidon, Jason-1, ERS, Envisat)를 이용한 한반도 주변해역에서의 해수면 고도 변화와 해수면 온도의 상관성 연구, 대한원격탐사학회지, **22**(6), 519-531.
- Aubrey, D., 1985, Recent sea levels from tide gauge: problems and prognosis: in National Academy of Sciences, Glaciers, ice Sheets and Sea-Level-Effect of a CO₂-induced climatic change, Washington, D.C., U.S. Department of Energy, Carbon Dioxide Research Division, DOE/ER/60235-1, 73-91.
- Barnett, T., 1983, Recent changes in sea level and their possible causes. *Clim. Change*, **5**, 15-38.
- Barnett, T., 1984, The estimates of 'global' sea level change: a problem of uniqueness. *J. Geophys. Res.*, **89**, 7980-7988.
- Barnett, T., 1988, Global sea level. In *NCPO, Climate Variations Over the Past Century and the Greenhouse Effect*. A report based on the First Climate Trends Workshop, 7-9 Sept., 1988, Washington, DC, Nat'l Clim. Program Office/NOAA, Rockville, MD.
- Braatz, B. and Aubrey D., 1987, Recent relative sea-level change in eastern North America: in D. Nummedal, O.H. Pilkey, and J.D. Howard, eds., Sea-Level Fluctuation and Coastal Evolution, *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication*, **41**, 29-46.
- Cho, K., 2002, Sea-level trend at the Korean coast, *Journal of the Environmental Sciences*, **11**(11), 1141-1147
- Douglas, B., 1991, Global sea level rise. *J. Geophys. Res.*, **96**, 6981-6992.
- Emery, K., 1980, Relative sea levels from tide-gauge records. *Proc. Natl. Acad. Sci., Washington, DC*, **77**(12), 6968-6972.
- Fairbridge, R. and Krebs, O., 1962, Sea level and the southern oscillation. *Geophys. J.*, **6**, 532-545.
- Ghyben, W., 1888, Nota in verband met de voorgenomen put-boring nabij Amsterdam, *Tijdschrift van Let Koninklijk Inst. Van Ing.*
- Gornitz, V. and Lebedeff, S., 1987, Global sea level changes during the past century. In *Sea Level Fluctuation and Coastal Evolution*, D. Nummedal, O.H. Pilkey and J.D. Howard (eds.). SEPM Special Publication No. 41, 3-16.
- Gornitz, V., Lebedeff, S., and Hansen, J., 1982, Global sea level trend in the past century. *Science*, **215**, 1611-1614.
- Gornitz, V. and Seeber L., 1990, Vertical crustal movement along the East Coast, North America, from historic and late Holocene sea level data, *Tectonophysics*, **178**, 127-150.
- Guetenberg, B., 1941, Change in sea level, post-glacial uplift and mobility on the earth's interior. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **52**, 721-772.
- Herzberg, A., 1901, Die Wasserversorgung einiger Nordseebader. *J. Gasbeleucht. Wasserversorg.*, **44**, 815-819.
- IPCC, 2007, Climate Change 2007 the Physical Science Basis, Cambridge Press, 385-428.
- Klige, R., 1982, Oceanic level fluctuations in the history of the earth. In *Sea and Oceanic Level Fluctuations for 15,000 years*. Acad. Sc. USSR, Institute of Geography, Moscow, Nauka (in Russian), 11-22.
- Kuenen, P., 1950, *Marine Geology*. Wiley, New York.
- Lisitzin, E., 1974, *Sea Level Changes*. Elsevier, New York.
- Pang, I. and Oh, I., 1994, Long-period sea level variations around Korea, Japan, and Russia. *Bull. Korean Fish. Soc.*, **27**(6), 733-753.
- Peltier, W. and Tushingham, A., 1989, Global sea level rise and the greenhouse effect; might they be connected?, *Science*, **244**, 806-810.
- Peltier, W. and Tushingham, A., 1991, Influence of glacial isostatic adjustment on tide-gauge measurements of secular sea level change. *J. Geophys. Res.*, **96**(B4), 6779-6796.
- Pirazzoli, P., 1989, Present and near-future global sea-level changes, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Global and Planetary Change Section)*, **75**, 241-258.
- Richter B. and Kreidler C., 1993, *Geochemical Techniques for Identifying Sources of Ground-Water Salinization*, CRN Press Inc..
- Robin, G., 1986, Changing the Sea Level, In: Bolin B., Döös B., Jäger J., Warrick R. (ed.), *The Greenhouse Effect, Climatic Change and Ecosystems*, John Wiley & Sons, 323-359.
- Sherif M. and Vijay P., 1999, Effect of climate change on sea water intrusion in coastal aquifers, *Hydrological Processes*, **13**, 1277-1287.
- Thorarinsson, S., 1940, Present glacier shrinkage and eustatic change in sea level. *Geogr. Ann.*, **22**, 131-159.
- Trupin, A. and Wahr, J., 1990, Spectroscopic analysis of global tide-gauge sea level data. *Geophys. J. Int.*, **100**, 441-453.
- Wahr, J. and Trupin, A., 1990, New computation of global sea level rise from 1990 tide-gauge data. *EOS*, **71**, 1267.
- Warrick, R. and Oerlemans, J., 1990, Sea level rise. In *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*, J. T. Houghton, Jenkins and J.J. Ephraums (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, 258-281.